

DOI: 10.5846/stxb202107091846

博文静, 沈钰仟, 王馨悦, 肖焱, 欧阳志云. 植被覆盖度对夏季降温效应的影响——以内蒙古为例. 生态学报, 2022, 42(22): 9165-9174.

Bo W J, Shen Y Q, Wang X Y, Xiao Y, Ouyang Z Y. The influence of vegetation coverage on cooling effect in summer: A case study of the Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9165-9174.

# 植被覆盖度对夏季降温效应的影响 ——以内蒙古为例

博文静<sup>1</sup>, 沈钰仟<sup>2,3</sup>, 王馨悦<sup>4</sup>, 肖焱<sup>2,\*</sup>, 欧阳志云<sup>2</sup>

1 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091

2 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 国家林业和草原局产业发展规划院, 北京 100010

**摘要:**随着全球变暖的加剧, 区域热环境问题日益凸显, 植被的降温作用逐渐得到广泛关注。目前已有的研究多从样地尺度分析不同类型植被的降温效应。而区域尺度的研究多从定性的角度揭示地表温度与植被覆盖的关系, 对评估植被的实际降温效应具有一定的局限性。以内蒙古为研究区, 以 MODIS 地表温度数据为基础, 采用近邻分析法, 将森林、灌丛和草地的 MODIS 地表温度与相邻 5km 范围内的低覆盖地表作为对照, 分析植被的降温效应以及植被覆盖度对降温效应的影响。从 2015 年 7 月地表温度平均值的结果来看, 降温度数在蒙东、蒙中和蒙甘区均呈现森林>灌丛>草地。森林的降温范围在 0.67—1.03℃, 灌丛为 0.60—0.95℃, 草地为 0.47—0.86℃。植被降温度数与植被覆盖度的回归拟合为对数分布, 均呈显著正相关 ( $P < 0.01$ )。且在不同的植被覆盖度范围内植被降温效应具有显著差异, 植被覆盖度水平较低时 (<40%), 植被覆盖度的增加能更显著地降低地表温度。从整体来看, 植被覆盖度每增加 10%, 森林降温 0.12—0.39℃; 灌丛降温 0.1—0.2℃; 草地降温 0.049—0.075℃。综上, 内蒙古作为全球气候变化最为敏感的区域之一, 研究植被的夏季降温效应能够为内蒙古的气候调节服务评估提供重要的理论支撑及案例参考。

**关键词:**降温效应; 植被覆盖度; 内蒙古; 气候区

## The influence of vegetation coverage on cooling effect in summer: A case study of the Inner Mongolia

BO Wenjing<sup>1</sup>, SHEN Yuqian<sup>2,3</sup>, WANG Xinyue<sup>4</sup>, XIAO Yi<sup>2,\*</sup>, OUYANG Zhiyun<sup>2</sup>

1 Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Industrial Development Planning Institute, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100010, China

**Abstract:** As global warming intensifies, regional thermal environment problems are becoming increasingly prominent. Therefore, the cooling effect of vegetation has gradually gained widely attention. Existing studies mostly analyzed the cooling effect of different types of vegetation from plot-scale. However, studies on region scale mostly focused on the qualitative analysis of relationship between vegetation parameters and surface temperature. Due to lack of comparative analysis between test plot and control plot, there have certain limitations for evaluate actual cooling effect and calculate corresponding cooling value. Using the nearest neighbor analysis in this article, the MODIS surface temperature of forest, shrub and grassland

**基金项目:**中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2020SY032)

**收稿日期:**2021-07-09; **网络出版日期:**2022-07-12

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaoyi@rcees.ac.cn

were compared with the surface temperature of low coverage to analyze the cooling effect of vegetation. The range of the control area was selected as 5km because adequate control plots were found within this distance. The regression fitting was used to analyze the influence of vegetation coverage on cooling effect. According to the results, cooling effect in Eastern Inner Mongolia, Central Inner Mongolia, and Inner Mongolia-Gansu subregions all showed forest > shrub > grassland. The range of temperature reduction in forest was 0.67—1.03 °C, that in shrub was 0.60—0.95 °C, and that in grassland was 0.47—0.86 °C. The regression fitting of vegetation cooling degree and vegetation coverage was logarithmic distribution, and which showed significantly positive correlation ( $P < 0.01$ ). When the vegetation coverage level is lower ( $< 40\%$ ), the increase of vegetation coverage can significantly reduce the surface temperature. For example, every 10% increase in low coverage forests ( $< 40\%$ ), the range of temperature reduction was 0.20—0.27 °C, that in medium coverage forests (40%—60%) was 0.12—0.16 °C, and that in high coverage forests ( $> 60\%$ ) was 0.07—0.10 °C. Differences in the cooling effect of different vegetation coverage may be affected by multiple factors such as vegetation transpiration, surface reflection, shading, roughness, and so on. The results showed that trees can effectively block direct sunlight, and the cooling effect is significantly higher than that of shrubs and herbs. For instance, every 10% increase in vegetation coverage would result in forest cooling of 0.12—0.39 °C, shrub cooling of 0.1—0.2 °C and grassland cooling of 0.049—0.075 °C. In conclusion, Inner Mongolia is one of the most sensitive regions to global climate change. To study the cooling effect of vegetation can provide importantly theoretical support and case reference for the assessment of climate regulation services in the Inner Mongolia.

**Key Words:** cooling effect; vegetation coverage; Inner Mongolia; climatic zone

在全球气候变暖和城市化进程加剧的背景下,生态系统的气候调节功能逐渐得到广泛的关注<sup>[1-3]</sup>。植被一方面通过固碳作用调节区域生物地球化学循环,减少温室效应;另一方面通过蒸腾和地表反照等生物物理过程调节区域气候<sup>[4]</sup>。植被通过蒸腾作用从环境中带走大量热量,形成降温效应,但同时地表反照率降低又在一定程度上造成地表温度的上升。目前已有研究表明热带地区植被较高的蒸腾量能抵消较低的地表反照率低造成的影响,具有显著的降温效应;寒带地区地表反照效应更强,植被覆盖增加会在一定程度引起地表温度升高<sup>[5]</sup>;而温带地区由于植被蒸腾作用差异性较大,该区域植被的气候调节作用还存在一定的争议<sup>[6]</sup>。

植被覆盖度是陆面过程模式中重要的参数之一,它决定着植被蒸腾、地表反照、粗糙度、陆面水文循环以及土壤热通量等,进而引起地表温度和近地面气温的变化<sup>[7]</sup>。目前研究植被覆盖度变化对地表温度影响的案例较多,如 Jin 等<sup>[8]</sup>研究了中国黄土高原植被覆盖对地表温度时空变化的影响,结果表明在干旱区、半干旱区和湿润区植被覆盖度与地表温度的关系呈显著差异。庞光辉等<sup>[9]</sup>研究表明沈阳市植被覆盖度与地表温度呈显著负相关。高尚等<sup>[10]</sup>研究表明,植被对地表温度的降温呈不同的线性特征,随着植被覆盖度的升高,降温效果越来越不显著。已有的研究多从定性的角度揭示不同区域地表温度与植被覆盖度的关系。而植被覆盖对降温度影响的研究多基于气温实际调查数据,如高吉喜等<sup>[11]</sup>研究了北京市城市绿地群落结构对降温效应的影响,认为冠层郁闭度介于 0.6—0.85 的乔灌木具有较大的降温效应。谢紫霞等<sup>[12]</sup>以上海市为例,调查分析了 18 个典型城市绿地样地,认为上海夏季城市绿地日均降温 1.17—5.6°C。基于样地的研究数据可靠性较高,但由于观测点数量有限,空间分辨率较低,在评估区域尺度植被降温价值方面具有一定的局限性<sup>[13]</sup>。Li 等<sup>[4]</sup>结合 MODIS 地表温度数据研究全球森林的气候调节效应,将森林与周边空旷地的地表温度做对比,结果表明热带地区森林白天能降温 2.41°C 左右,中纬度地区森林降温 0.97°C 左右,且阔叶林比针叶林具有更好的降温效果。但目前灌丛和草地的降温效应以及植被覆盖度等因素对降温效应影响的相关研究案例较少。

近年来,天然林保护、退耕还林、京津风沙源等生态保护工程的实施显著增加了内蒙古地区的植被覆盖面积和质量<sup>[14]</sup>。本文以内蒙古为研究区,以 MODIS 地表温度数据为基础,通过对比植被区与周边对照区(低覆盖植被区)的地表温度差,分析森林、灌丛和草地的夏季降温效应以及植被覆盖度对降温效应的影响。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 研究区概况

内蒙古位于中国北部边疆(37°24'—53°23'N 和 97°12'—126°04'E),东起大兴安岭,西至居延湖畔,由东北向西南斜伸,呈狭长形,共分为7个气候区(图1)。由于根河区、小兴安岭区、松辽区等气候区内样地数据较少,本文主要研究了蒙东区、蒙中区和蒙甘区3个主要气候区的植被降温效应。内蒙古作为我国北部重要的生态屏障,属于干旱、半干旱气候和东南沿海湿润、半湿润季风气候的过渡带,生态环境脆弱,是全球气候变化最为敏感的区域之一。该地区植被类型丰富,沿东北-西南一线依次为森林、草原和沙漠(图2)。夏季高温天气集中在7—8月,根据2018年的气象观测数据,内蒙古119个气象站,其中78个气象站出现 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的高温天气495次,主要分布在阿拉善盟、乌海市、巴彦淖尔市西南部、锡林郭勒盟西北部、赤峰市中北部等地区<sup>[15]</sup>。

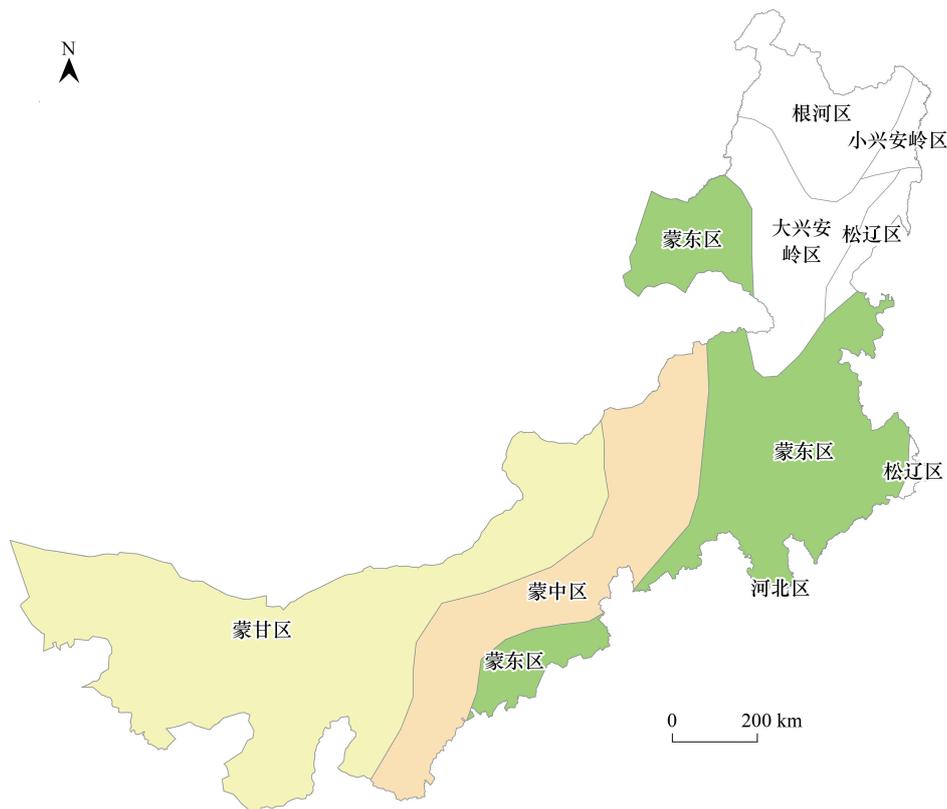


图1 内蒙古气候区分布图

Fig.1 The distribution map of climatic regions in Inner Mongolia

### 1.2 数据来源

本研究采用的内蒙古生态系统类型数据来源于“全国十年生态调查与评估”项目数据库<sup>[16]</sup>。数据以国产环境灾害卫星(HJ-1A/B)和美国陆地卫星(Landsat OLI)数据为信息源,采用面向对象的多尺度分割、建立决策树进行分类的方法,得到空间分辨率为30m的生态系统类型分布数据。植被覆盖度(图3)及气候区划数据来源于中科院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>)。MODIS地表温度数据(MODLT1M)是中国1km地表温度月合成产品,来源于中科院地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),由MODLT1T产品(每日温度)经过合成计算得到,计算方法为取月平均值。降温效应分别采用MODIS地表温度2015年7月的最大值、2015年7月平均值进行比较分析。因大气条件等因素影响,采用S-G滤波法分别对2000—2015年逐月

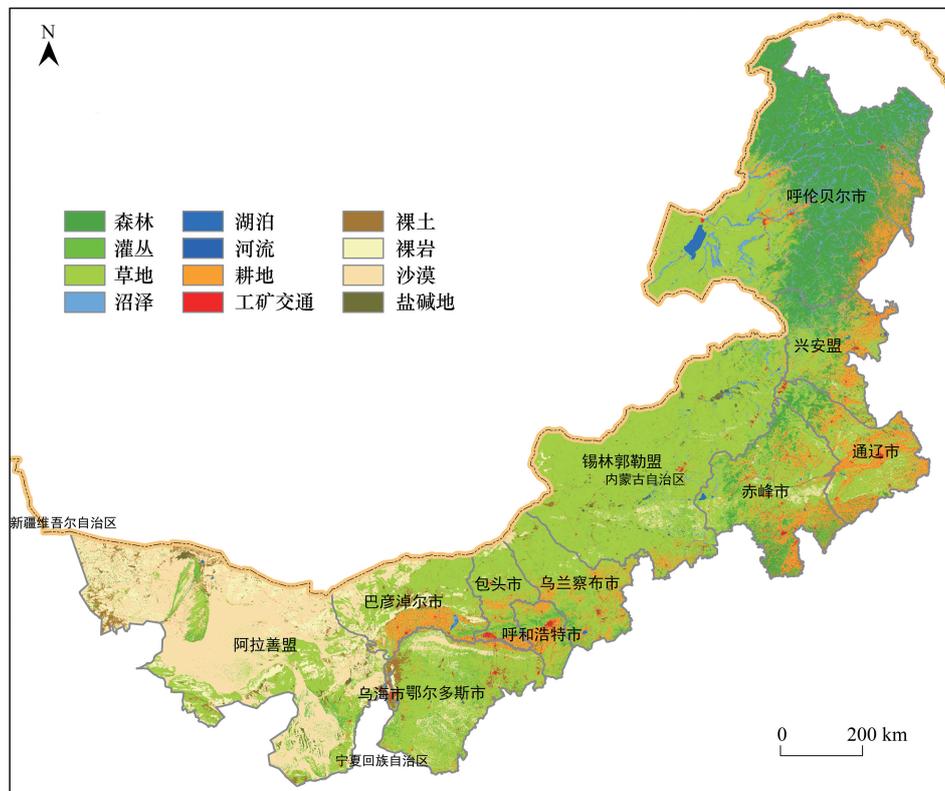


图 2 内蒙古土地利用图

Fig.2 The study area location and land use map

MODIS 地表温度数据的异常值进行滤波。S-G 滤波是由 Savitzky 等<sup>[17]</sup>提出的一种在时域内基于多项式最小二乘法拟合的滤波方法。其表达式为:

$$Y_j^* = \sum_{i=-m}^{i=m} \frac{C_i Y_{j+1}}{N}$$

式中,  $Y_j^*$  为合成序列数据,  $Y_{j+1}$  代表原始序列数据,  $C_i$  为滤波系数。  $N$  为滑动窗口所包括的数据点 ( $2m+1$ )。

## 2 研究方法

本研究中植被降温效应采用近邻分析法,利用 ArcGIS 将森林、灌丛、草地栅格分别与对照栅格做近邻分析。对照与样地的距离采取最小化原则,但由于小范围对照样地的数量较少,所以选取 5km 作为对照区的范围。提取植被地表温度与 5km 范围内所有对照样地的平均差值,即为植被的降温度数。例如图 4 中,1 号栅格为植被样地,2、3、4 号栅格均为对照样地。对照区平均地表温度即 2、3、4 号栅格地表温度的平均值,样地区地表温度即为 1 号样地的地表温度。

由于单纯将裸土作为对照,样本数据较少,不足以分析植被覆盖度与降温效应的关系。且已有研究表明,植被覆盖度较低 (<20%) 时植被降温效应不明显<sup>[18-19]</sup>。本研究将植被覆盖度小于 20% 的土地类型作为植被降温效应的对照。同时,考虑海拔高度对降温效应的影响,剔除与对照的海拔差大于 100m 的样地数据。各气候区的植被覆盖与降温度数样本数量见表 1。

$$T_i = B_i - V_i$$

式中,  $T_i$  是第  $i$  个栅格的降温度数;  $B_i$  是第  $i$  个栅格的对照区平均地表温度;  $V_i$  是第  $i$  个栅格的植被区平均地表温度。

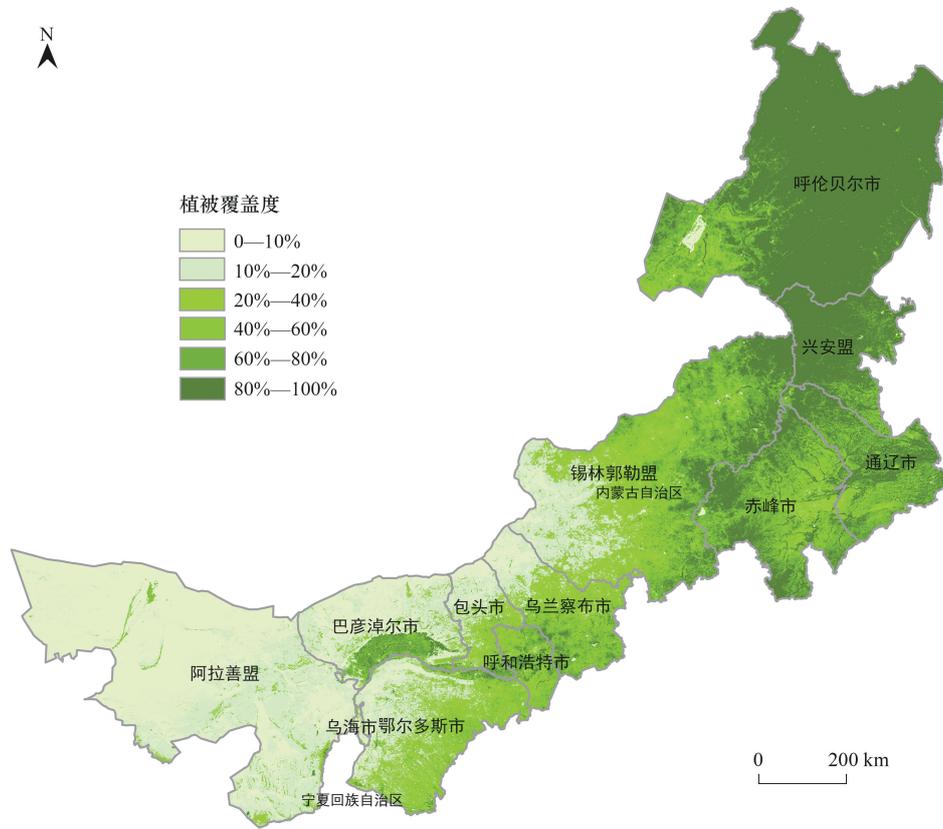


图 3 内蒙古植被覆盖度分布图

Fig.3 The distribution map of vegetation coverage in Inner Mongolia

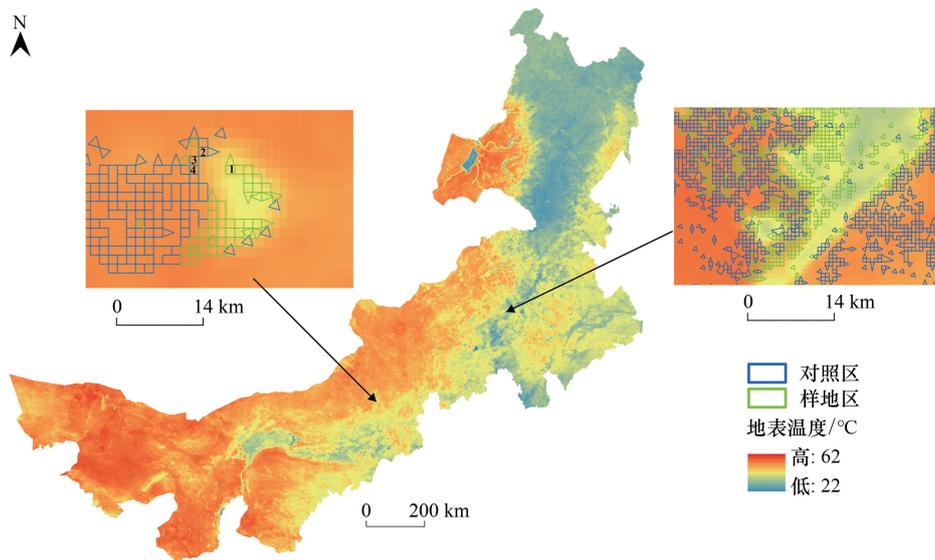


图 4 样地与对照区示意图

Fig.4 Schematic diagram of sample plot and control area

1:植被样地栅格 1 Vegetation plot grid 1; 2:低覆盖对照样地栅格 2 Low coverage control plot grid 2; 3:低覆盖对照样地栅格 3 Low coverage control plot grid 3; 4:低覆盖对照样地栅格 4 Low coverage control plot grid 4

表 1 内蒙古各气候区植被覆盖度与降温度数回归分析样本数量

Table 1 The sample number of regression analysis of vegetation coverage and temperature reduction in various climatic areas of Inner Mongolia

样本数量/个 Number of samples		森林 Forest		灌丛 Shrub		草地 Grassland	
		总样本 Total samples	高覆盖(>60%) High coverage samples	总样本 Total samples	高覆盖(>60%) High coverage samples	总样本 Total samples	高覆盖(>60%) High coverage samples
蒙东区	最大值	1094	491	562	126	1023	769
Eastern Inner Mongolia	平均值	957	507	2023	490	2339	1188
蒙中区	最大值	9012	1003	2090	154	4868	320
Central Inner Mongolia	平均值	6752	579	77057	1170	12652	453
蒙甘区	最大值	15245	637	4571	46	41614	14
Inner Mongolia-Gansu	平均值	12787	318	84612	612	72565	19

### 3 结果分析

#### 3.1 内蒙古植被的降温效应

本文采用近邻分析法研究内蒙古植被的降温效应。从 2015 年 7 月最大值和月平均值的分析结果来看, 由于月最大值提高了对照区的地表温度, 降温度数显著高于月平均值。此外, 月最大值的数据变异性相比月平均值也较高(图 5)。从月均值的结果来看, 由于蒸腾、反射和遮阴能力的差异, 森林降温度数显著高于灌丛和草地。内蒙古蒙东区、蒙中区和蒙甘区的植被降温范围为森林 0.67—1.03℃, 灌丛 0.60—0.95℃, 草地 0.47—0.86℃(表 2)。

表 2 内蒙古主要气候区植被平均降温度数

Table 2 The temperature reduction from vegetation in main climatic regions of Inner Mongolia

植被类型 Vegetation type	蒙东区 Eastern Inner Mongolia		蒙中区 Central Inner Mongolia		蒙甘区 Inner Mongolia-Gansu	
	最大值 Maximum	平均值 Average	最大值 Maximum	平均值 Average	最大值 Maximum	平均值 Average
森林 Forest/℃	2.59	1.03	1.84	0.80	1.12	0.67
灌丛 Shrub/℃	0.95	0.95	0.71	0.71	0.60	0.60
草地 Grassland/℃	4.08	0.86	2.33	0.59	0.96	0.47

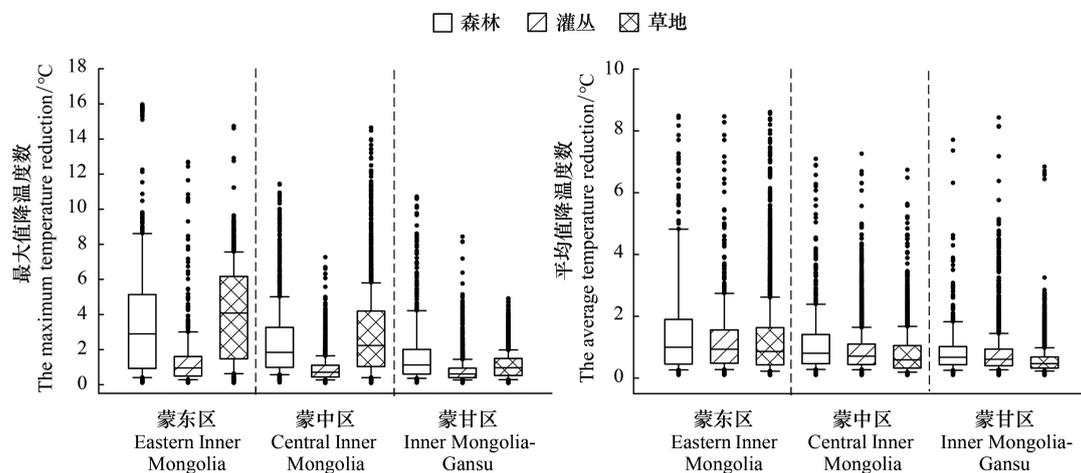


图 5 内蒙古森林、灌丛和草地月最大值和月平均值降温度数图

Fig.5 The monthly maximum and average temperature reduction in forest, shrub and grassland in Inner Mongolia

### 3.2 植被覆盖度对降温效应的影响

植被覆盖度是衡量区域植被质量状况的主要指标之一<sup>[20]</sup>。研究表明,绿色植被的实际降温能力与植被覆盖度显著相关,同一植被类型的高覆盖植被降温效果优于低覆盖<sup>[21-22]</sup>。本研究将各气候区内植被覆盖度相同的森林、灌丛、草地的降温度数作为组内重复,采用箱线图法剔除组内异常值,将各组的降温平均值分别与植被覆盖度做回归拟合。结果表明,内蒙古3个主要气候区(蒙东、蒙中、蒙甘)森林、灌丛和草地的植被覆盖度与降温度数均呈显著正相关关系。总体来看,植被覆盖度与降温度数的回归方程的 $R^2$ 值为0.2—0.8之间,说明植被降温效应还受其他因素的影响,如景观格局、斑块面积、区域气候、经营措施等(图6)。

从2015年7月最大值和月平均值两组数据的比较来看,月最大值提高了对照样地的地表温度,导致降温度数偏高(图6),影响整体的植被覆盖度拟合结果。从月平均值结果来看,植被覆盖度对植被降温效应具有显著差异,植被覆盖度水平较低时(<40%),植被覆盖度的增加能更显著地降低地表温度。如植被覆盖度每增加10%,低覆盖森林(20%—40%)降温0.20—0.27℃;中覆盖森林(40%—60%)降温0.12—0.16℃;高覆盖森林(>60%)降温0.07—0.10℃。不同植被覆盖度降温效应的差异可能受到植被蒸腾、地表反照、遮阴、粗糙度、以及土壤热通量等多因素的影响。

从各植被类型的降温效果看,乔木能有效阻挡阳光直射,降温效应显著高于灌木和草本植物<sup>[21-22]</sup>。本研究表明,植被覆盖度每增加10%,森林降温度数提高0.12—0.39℃,灌丛降温提高0.1—0.2℃,草地降温提高0.049—0.075℃(图7)。

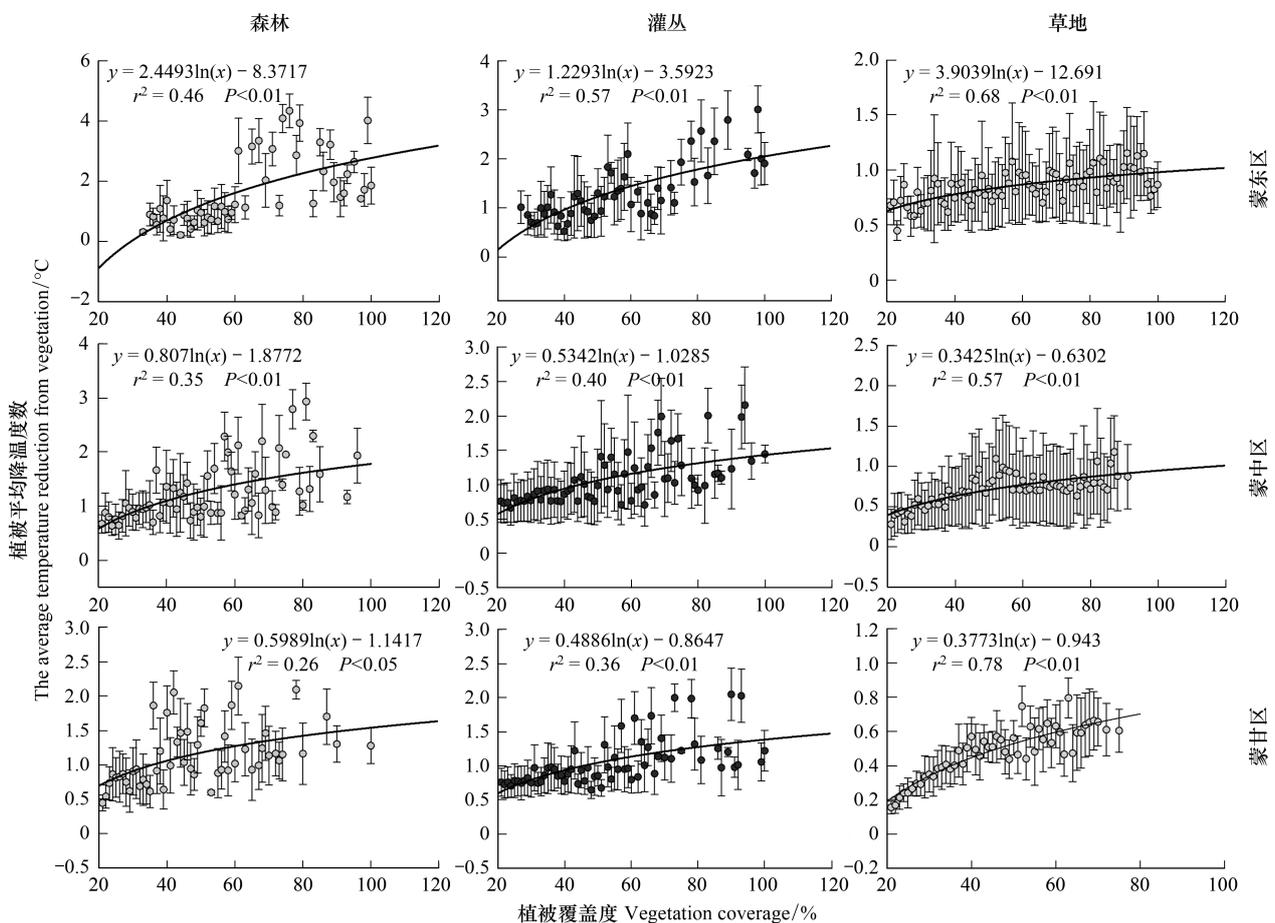


图6 植被覆盖度与月平均值降温度数回归拟合

Fig.6 Regression fitting diagram of vegetation coverage and monthly average cooling effect

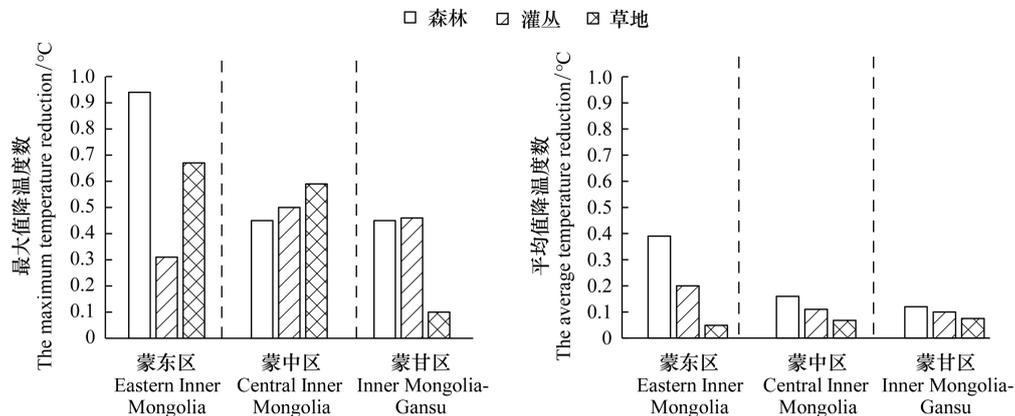


图7 2015年7月最大值与平均值植被覆盖度每增加10%的降温度数

Fig.7 Monthly maximum and average cooling effects of every 10% increase of vegetation coverage

#### 4 讨论

(1) 本研究比较了采用2015年7月最大值和月均值两期数据对结果的差异,月最大值的降温度数显著高于月平均值,可能原因在于极端最大值提高了植被区和对照区的温度差,导致植被降温效应被高估。该结果与张彪等<sup>[23]</sup>的结论类似,认为采用最大值的降温度数比平均值高1—2°C。从月均值的结果来看,内蒙古植被的降温范围为0.47—1.03°C,而高凯等<sup>[24]</sup>研究了上海市城市绿地的降温效果,认为乔木降温2—2.8°C,灌木降温1.2°C,草坪降温0.6°C。本研究与上述研究结果相比,植被的降温度数偏低,一方面由于内蒙古地处于旱半干旱区,年平均降雨量仅为400mm左右,较低的降雨量和植被蒸腾量可能导致植被降温效应偏低;另一方面,上述研究选取城市裸地地表作为对照,而本研究选取低覆盖植被区作为对照,可能会低估植被的降温效应。

(2) 植被的降温效应受到诸多内外部因素的影响,如生态系统质量、群落结构、景观格局、区域气候、地形、高程等<sup>[25—26]</sup>。很多研究表明,地表温度与归一化植被指数(NDVI)呈线性显著负相关。植被覆盖度是植物生长状态和植被质量的常用指示因子<sup>[20]</sup>。前人研究表明,以乔木为主的植被群落通过冠层遮阴和蒸散降温的共同作用,表现为植被覆盖度对降温作用的积极影响<sup>[27—28]</sup>。一方面,植被覆盖度增加能显著增加遮阴面积,从而有效减少太阳辐射到达地表的比,避免地表温度的剧烈上升;另一方面,植被覆盖度直接影响土壤水分涵养能力和区域植物体内水分含量<sup>[29]</sup>,从而影响地表蒸散量。地表蒸散发过程能从周围环境带走大量热量,从而降低地表温度。

本研究将内蒙古森林、灌丛和草地的植被覆盖度分别与降温度数做回归分析,结果表明,植被覆盖度每增加10%,森林夏季降温度数提高0.12—0.39°C,灌丛降温提高0.1—0.2°C,草地降温提高0.049—0.075°C。而张小飞等<sup>[30]</sup>研究了深圳市地表温度与植被覆盖度的定量关系,认为植被覆盖度20%—50%之间时,植被覆盖度提高10%,降低地表温度0.3°C。庞光辉等<sup>[9]</sup>对沈阳市植被覆盖变化与降温效应关系的研究,提出植被覆盖度每提升10%,则平均可降温0.71°C。本文结果与上述研究有一定的差异,主要原因在于不同区域降雨、蒸腾等气候条件影响植被蒸腾与地表反照率,从而对降温效应造成影响。此外,本文使用的近邻分析法与采用植被覆盖度与地表温度直接回归拟合的方法相比,其结果可能具有一定的差异。

(3) 由于陆地表面的复杂性以及地表温度本身的瞬时多变,MODIS地表温度数据存在一定的误差。因此对MODIS LST产品精度的验证是应用之前必不可少的环节<sup>[31]</sup>。本研究结合内蒙古35个有地表温度监测数据的气象站点数据,得出2015年7月站点地表温度最大值的日平均值与遥感地表温度7月平均值具有显著相关关系, $R^2$ 值分别为0.14和0.25。由于LST卫星观测时间与站点气温观测时间存在不一致,这些都可能影

响地表温度与气温的相关关系<sup>[32]</sup>。虽然 MODIS LST 产品精度存在不确定性,但温度趋势与站点监测数据具有一致性。而本研究的重点是突出植被覆盖对地表温度的影响,所以能够在一定程度上反映植被的降温效应。

(4)本研究仅选择了 2015 年的数据,主要原因是对比了 2000 年的数据分析,发现植被降温效应基本一致,仅蒙东区有小幅差异,可能与年际间植被覆盖以及气温的变化有关。而 2000—2015 多年平均数据由于土地利用、植被覆盖度变化等原因,导致有效样地与对照数量不足。此外,植被类型、群落结构、地理位置等都有可能影响植被的降温效应,未来的研究应重点考虑上述因素的影响。

综上,本研究采用近邻分析法结合 MODIS 地温数据研究内蒙古自然植被的夏季降温效应以及植被覆盖度对降温效应的影响,从区域尺度研究不同类型和质量的植被对气候调节的实际贡献。在全球变暖的背景下,为内蒙古地区植被恢复和保护提供一定的参考。但目前还存在一些问题:如未考虑群落结构指标,如乔灌草、乔灌、乔草等降温效应的差异以及如何设置合理的尺度范围能更好的反映实际降温效应等。综合考虑上述诸多因素并不断验证和完善,是本研究今后的重点研究方向。

## 5 结论

(1)本研究采用 ArcGIS 的近邻分析法,结合内蒙古 MODIS 地表温度数据,将不同气候区植被与对照(植被覆盖度小于 20%)的地表温度进行对比。从 2015 年 7 月平均值的结果来看,降温效应是森林>灌丛>草地,降温范围分别为森林 0.67—1.03℃,灌丛 0.60—0.95℃,草地 0.47—0.86℃。

(2)本文将森林、灌丛和草地的植被覆盖度分别与降温度数做回归分析,结果表明植被覆盖度与降温度数回归拟合结果呈对数增长曲线,显著正相关( $P<0.01$ )。从月均值结果来看,植被覆盖度每增加 10%,森林降温度数提高 0.12—0.39℃,灌丛提高 0.1—0.2℃,草地提高 0.049—0.075℃。

(3)从两组数据的分析结果来看,月最大值的降温度数较高。主要原因在于采用月极端最大值提高了对照区的平均地表温度,植被覆盖较低的区域地表温度变异性相对较大,可能造成降温效应被高估。总体来看,月平均值能更好的反映植被实际的降温效应。

## 参考文献(References):

- [ 1 ] Zhou D C, Li D, Sun G, Zhang L X, Liu Y Q, Hao L. Contrasting effects of urbanization and agriculture on surface temperature in Eastern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(16): 9597-9606.
- [ 2 ] Ma L W, Bicking S, Müller F. Mapping and comparing ecosystem service indicators of global climate regulation in Schleswig-Holstein, Northern Germany. *Science of The Total Environment*, 2019, 648:1582-1597.
- [ 3 ] 黄麟. 造林气候调节效应及其影响机理研究进展. *生态学报*. 2021,41(2): 469-478.
- [ 4 ] Li Y, Zhao M S, Motesharrei S, Mu Q Z, Kalnay E, Li S C. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nature Communications*, 2015, 6: 6603.
- [ 5 ] Arora V K, Montenegro A. Small temperature benefits provided by realistic afforestation efforts. *Nature Geoscience*, 2011, 4(8): 514-518.
- [ 6 ] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320(5882): 1444-1449.
- [ 7 ] 何建军,余晔,陈晋北,刘娜,赵素平. 植被覆盖度对兰州地区气象场影响的模拟研究. *高原气象*, 2012, 31(6): 1611-1621.
- [ 8 ] Jin K, Wang F, Zong Q L, Qin P, Liu C X. Impact of variations in vegetation on surface air temperature change over the Chinese Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 136967.
- [ 9 ] 庞光辉,蒋明卓,洪再生. 沈阳市植被覆盖变化及其降温效应研究. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(1): 191-196.
- [ 10 ] 高尚,沙晋明,帅晨. 厦门市地表温度与植被覆盖关系定量研究. *福建师范大学学报:自然科学版*, 2019, 35(2): 14-21.
- [ 11 ] 高吉喜,宋婷,张彪,韩永伟,高馨婷,冯朝阳. 北京城市绿地群落结构对降温增湿功能的影响. *资源科学*, 2016, 38(6): 1028-1038.
- [ 12 ] 谢紫霞,张彪,余欣璐,郝亮. 上海城市绿地夏季降温效应及其影响因素. *生态学报*, 2020, 40(19): 6749-6760.
- [ 13 ] Lee X H, Goulden M L, Hollinger D Y, Barr A, Black T A, Bohrer G, Bracho R, Drake B, Goldstein A, Gu L H, Katul G, Kolb T, Law B E, Margolis H, Meyers T, Monson R, Munger W, Oren R, Paw U K T, Richardson A D, Schmid H P, Staebler R, Wofsy S, Zhao L. Observed increase in local cooling effect of deforestation at higher latitudes. *Nature*, 2011, 479(7373): 384-387.

- [14] Liu M, Dries L, Heijman W, Huang J K, Zhu X Q, Hu Y N, Chen H B. The impact of ecological construction programs on grassland conservation in Inner Mongolia, China. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(2): 326-336.
- [15] 李一平, 赵斐. 2018 年内蒙古高温天气统计分析. *内蒙古气象*, 2019(6): 3-7, 16.
- [16] 肖懿. 中国生态系统评估与生态安全数据库. (2014-11-19) [2017-11-27]. <http://www.ecosystem.csdb.cn/>
- [17] 边金虎, 李爱农, 宋孟强, 马利群, 蒋锦刚. MODIS 植被指数时间序列 Savitzky-Golay 滤波算法重构. *遥感学报*, 2010, 14(4): 725-741.
- [18] 朱春阳, 李树华, 纪鹏. 城市带状绿地结构类型与温湿效应的关系. *应用生态学报*, 2011, 22(5): 1255-1260.
- [19] 巴彦. 草地不同盖度条件下地温变化规律初探. *内蒙古气象*, 2005(4): 27-29.
- [20] 王刚, 管东生. 植被覆盖度和归一化湿度指数对热力景观格局的影响——以广州为例. *应用生态学报*, 2012, 23(9): 2429-2436.
- [21] Mackey C W, Lee X H, Smith R B. Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urban heat island. *Building and Environment*, 2012, 49: 348-358.
- [22] 赵伟, 文凤平, 张林波, 高艳妮, 何珏霖. 厦门市绿色植被降温服务功能核算及其时空动态特征. *环境科学研究*, 2019, 32(1): 85-94.
- [23] 张彪, 谢紫霞, 高吉喜, 余欣璐. 上海市绿地植被的吸热降温效益评估. *自然资源学报*, 2021, 36(5): 1334-1345.
- [24] 高凯, 秦俊, 宋坤, 胡永红. 城市居住区绿地斑块的降温效应及影响因素分析. *植物资源与环境学报*, 2009, 18(3): 50-55.
- [25] Feyisa G L, Dons K, Meilby H. Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect; an example from Addis Ababa. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 123: 87-95.
- [26] Zölch T, Maderspacher J, Wamsler C, Pauleit S. Using green infrastructure for urban climate-proofing: an evaluation of heat mitigation measures at the micro-scale. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 20: 305-316.
- [27] Zhang B, Xie G D, Gao J X, Yang Y. The cooling effect of urban green spaces as a contribution to energy-saving and emission-reduction; a case study in Beijing, China. *Building and Environment*, 2014, 76: 37-43.
- [28] 林楠, 姜然哲, 刘强, 郭晓东, 杨航, 陈思. 近 20 年三江平原地表蒸散发时空特征及驱动因素分析. *中国地质*, 2021, 48(5): 1392-1407.
- [29] 黄和平, 邹金浪. 城市不同植物群落小尺度范围内降温增湿效应的时空变化. *水土保持通报*, 2013, 33(4): 307-311.
- [30] 张小飞, 王仰麟, 吴健生, 李卫锋, 李正国. 城市地域地表温度-植被覆盖定量关系分析——以深圳市为例. *地理研究*, 2006, 25(3): 369-377, 561.
- [31] 马晋, 周纪, 刘绍民, 王钰佳. 卫星遥感地表温度的真实性检验研究进展. *地球科学进展*, 2017, 32(6): 615-629.
- [32] 刘晨晨, 曹广真, 张明伟, 牛新赞, 许文波, 范锦龙. 时空尺度对利用 MODIS 地表温度估算空气温度的影响研究. *遥感技术与应用*, 2013, 28(5): 831-835.